MONITOREO HEMODINÁMICO POR ECOCARDIOGRAFÍA

HEMODYNAMIC MONITORING BY ECHOCARDIOGRAPHY

NANCY S. MONGA AGUILAR[1], PABLO MERLO[2]

RESUMEN

En las unidades de cuidado crítico es frecuente la inestabilidad hemodinámica por lo que se necesitan frecuentemente sistemas de monitorización, y aquí el examen de ultrasonido cardíaco en el punto de atención (FoCUS), realizado de acuerdo con un protocolo de exploración estandarizado pero restringido, como una extensión del examen clínico, constituye una herramienta de diagnóstico de primera línea para evaluación inicial del paciente en entornos agudos y críticos, permitiendo obtener la información hemodinámica de forma no invasiva que se precisa para el tratamiento de los pacientes críticos.

La evidencia científica sobre la valoración hemodinámica por ecocardiografía inicialmente fue controvertida, pero con el transcurso de los años se han realizado varias revisiones comparándola con diferentes métodos invasivos. Philoppe Vignon, en el año 2018, compara la evaluación hemodinámica en pacientes con shock séptico por medio de medición con catéter por termodilución y ecocardiografía, y concluye que existe una correlación aceptable entre los 2 métodos.

La monitorización ecocardiográfica constituye una técnica que como falencia principal es ser operador dependiente, por cuya razón es de vital importancia la capacitación óptima en la adquisición adecuada e interpretación de imágenes para disminuir el margen de error interobservador.

La valoración del estado hemodinámico se basa en dos conceptos: la perfusión y la congestión; la finalidad es obtener datos suficientes que garanticen un manejo terapéutico adecuado para la optimización de la perfusión tisular, que está determinada por el contenido arterial de oxígeno, de hemoglobina y el gasto cardíaco, que permiten el transporte de oxígeno a los tejidos.

El monitoreo hemodinámico ayuda a la optimización de la precarga en pacientes con bajo gasto cardíaco de diferentes causas subyacentes, como en la insuficiencia cardíaca, tromboembolismo de pulmón, afecciones agudas del miocardio y pericardio, taponamiento cardíaco, manejo del shock, afecciones valvulares severas y posquirúrgicos de cirugía cardíaca o cirugía mayor abdominal.

La valoración hemodinámica no invasiva se realiza por medio del análisis de medidas volumétricas y de presiones tales como: volumen diastólico, descarga sistólica, gasto cardíaco, presión de la arteria pulmonar, presión de la aurícula izquierda, presión de fin de diástole del ventrículo izquierdo, función sistólica (fracción de eyección), resistencias vasculares (sistémicas, pulmonares), entre otras.

Palabras clave: gasto cardíaco, descarga sistólica, índice cardiaco, tracto de salida del ventrículo izquierdo, función sistólica del ventrículo izquierdo, presiones sistémicas pulmonares.

ABSTRACT

In critical care units, hemodynamic instability is frequent, so monitoring systems are frequently needed, and here the cardiac ultrasound examination at the point of care (focus), performed according to a standardized, but restricted, examination protocol. as an extension of the clinical examination, it constitutes a first-line diagnostic tool for initial evaluation of the patient in acute and critical environments, allowing non-invasive hemodynamic information to be obtained for the treatment of critically ill patients. the scientific evidence on hemodynamic evaluation by echocardiography was initially controversial, but several reviews have been carried out over the years comparing it with different invasive methods. philoppe vignon in 2018 compares the hemodynamic evaluation in patients with septic shock by means of catheter measurement by thermodilution and echocardiography, and concludes that there is an acceptable correlation between the 2 methods. echocardiographic monitoring is an operator-dependent technique, so optimal training in the proper acquisition and interpretation of images is of vital importance, which helps to reduce the margin of error. the assessment of hemodynamic status is based on two concepts: perfusion and congestion, the purpose of monitoring is to obtain sufficient data to guarantee adequate therapeutic management for the optimization of tissue perfusion, the same that is determined by arterial oxygen content., of hemoglobin and cardiac output that allows the transport of oxygen to the tissues hemodynamic monitoring helps to optimize the preload in patients with low expenditure of various origins such as heart failure, thromboembolism of cardiovascular origin, acute myocardial and pericardial conditions, cardiac tamponade, shock management, severe valve conditions, postoperative surgery. cardiac or major abdominal surgery. non-invasive hemodynamic assessment is performed by analyzing volumetric and pressure measurements such as: diastolic volume, systolic discharge, cardiac output, pulmonary artery pressure, left atrial pressure, left ventricular end-diastole pressure, systolic function (ejection fraction), vascular resistance (systemic, pulmonary), among others.

Keywords: cardiac output, systolic discharge, cardiac index, left ventricular outflow tract, left ventricular systolic function, pulmonary systemic pressures..

REVISTA CONAREC 2020;35(156):217-225 | HTTPS://DOI.ORG/10.32407/RCON/2020156/0217-0225

INTRODUCCIÓN

En las unidades de cuidado crítico es frecuente la inestabilidad hemodinámica, por lo que son necesarios sistemas de monitorización con capacidad de obtener variables cuantificables, fiables y capaces de valorar precarga (presión venosa central o presión capilar pulmonar), poscarga (resistencias vasculares) y contractilidad (función ventricular y gasto cardíaco).

Desde que la ecocardiografía dejó de limitarse a los laboratorios de imágenes y se introdujo en los ámbitos de cuidados críticos, nació la idea del ultrasonido cardíaco focal (FoCUS), que se define como un examen de ultrasonido cardíaco en el punto de atención, realizado de acuerdo con un protocolo de exploración estandarizado pero restringido, como una extensión del examen clínico, y constituye una herramienta de diagnóstico de primera línea para la evaluación inicial del paciente en entornos agudos, permitiendo obtener la información hemodinámica que se precisa para el tratamiento de los pacientes críticos de forma no invasiva[1,2].

La evidencia científica sobre la valoración hemodinámica por ecocardiografía (transtorácica y transesofágica) inicialmente fue controvertida, pero con el transcurso de los años se han realizado varias revisiones que la comparan con diferentes métodos invasivos, como el catéter de Swan

1. Médica Staff de Investigaciones Médicas y Docente de ASARUC (Asociación Argentina de Ultrasonografía Crítica).
2. Médico Staff de Investigaciones Médicas, Vicepresidente y Director del posgrado de la UBA en Ecocardiografía Crítica.

✉ ***Correspondencia:*** *Nancy Silvana Monga Aguilar. nancysilvana68@hotmail.com*

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Recibido: 22/07/2020 | **Aceptado:** 24/08/2020

SHOUT
SHARE
IT

Tabla 1.

- Insuficiencia cardíaca.
- Tromboembolismo pulmonar.
- Infarto agudo de miocardio.
- Miocardiopatías.
- Taponamiento cardíaco.
- Shock: séptico, cardiogénico, neurogénico, anafiláctico.
- Insuficiencia valvular masiva.
- Posquirúrgicos de cirugía cardíaca o cirugía mayor abdominal.
- Hipovolemia.

Ganz, a métodos modernos o mínimamente invasivos como análisis del contorno de pulso arterial, termodilución transpulmonar, litiodilución transpulmonar, sistema FloTrac®/Vigileo®, sistema MostCare®, entre otros[5].
La termodilución transpulmonar se basa en el análisis de una curva de termodilución que proporciona la medición del gasto cardíaco (GC), los parámetros volumétricos de precarga, el agua pulmonar extravascular, así como los parámetros derivados del rendimiento del miocardio y la permeabilidad vascular pulmonar; la tecnología incorporada de contorno de pulso proporciona un GC continuo e índices de respuesta a los líquidos[1,6].
El estudio de Philoppe Vignon en el año 2018 compara la evaluación hemodinámica en pacientes con *shock* séptico por medio de medición con catéter por termodilución y ecocardiografía y concluye que existe una correlación aceptable entre los dos métodos[1].
La ecocardiografía presenta una limitación de uso como sistema de "monitorización hemodinámica", ya que la medición no es continua, así como no evalúa el grado de hipoperfusión (por ejemplo, la saturación venosa central), y no permite estimar el tono vasomotor[1,3].
La monitorización ecocardiográfica incluye la adquisición de datos que depende de objetivos de imagen específicos, de condiciones o escenarios, del equipo de ultrasonido utilizado, de técnicas y protocolos aplicados y, en relación con el nivel de capacitación, la habilidad y perfil del operador individual, constituye una técnica operador dependiente. De este modo, es de vital importancia la capacitación adecuada del operador en la adquisición e interpretación correcta con el objetivo de disminuir el margen de error[6].
Idealmente, estos exámenes siempre deben ser realizados por un profesional experimentado en cuidados intensivos, debidamente capacitado tanto en ecocardiografía como en cuidados cardiovasculares agudos e intensivos[6].
Aunque históricamente los cardiólogos fueron exclusivamente responsables de realizar, supervisar e interpretar los exámenes ecocardiográficos, no siempre están disponibles en casos de emergencias médicas, por lo que la Asociación Europea de Imagen Cardiovascular (EACVI) ha reconocido desde hace mucho tiempo la existencia de una variedad de profesionales médicos que están involucrados en el manejo de emergencias cardiovasculares a diario. Entre estos se incluyen médicos de emergencia, especialistas en cuidados intensivos, anestesiólogos, ecografistas, fisiólogos cardíacos y becarios en entrenamiento, y que con el adecuado entrenamiento pueden reconocer hallazgos importantes y obtener respuestas claves en situaciones de emergencia mediante el uso de ultrasonido cardíaco[8].
La valoración del estado hemodinámico se basa en dos conceptos: la perfusión y la congestión. La finalidad de la monitorización es obtener datos suficientes que garanticen un manejo terapéutico adecuado para la optimización de la perfusión tisular, que está determinada por el contenido arterial de oxígeno, de hemoglobina y el GC, que permiten el transporte el oxígeno a los tejidos[5].

Tabla 2.

- Medidas volumétricas: volumen sistólico, descarga sistólica, gasto cardíaco
- Presión de la arteria pulmonar.
- Presión de la aurícula izquierda.
- Presión de fin de diástole de ventrículo izquierdo.
- Función sistólica ventricular (fracción de eyección).
- Resistencias vasculares (sistémicas, pulmonares).

Una de las aplicaciones de la monitorización ecocardiográfica que más se emplea es la optimización de la precarga en pacientes con bajo GC de varias etiologías, como insuficiencia cardíaca, tromboembolismo pulmonar, Infarto agudo de miocardio, taponamiento cardíaco, entre otras **(Tabla 1).**
Los parámetros más relevantes para la evaluación hemodinámica por medio de ecocardiografía son el análisis de la función sistólica por medio de índices eyectivos y volumétricos, análisis de las presiones de llenado y resistencias vasculares, entre otros[5] **(Tabla 2).**

INTEGRAL DE VELOCIDAD-TIEMPO DEL TRACTO DE SALIDA DEL VENTRÍCULO IZQUIERDO

La integral de la velocidad respecto del tiempo (VTI) se ha de interpretar como la longitud de la columna de sangre que pasa por el punto insonado en un latido. Si se tiene en cuenta que el tracto de salida del ventrículo izquierdo (TSVI) es una estructura cilíndrica que no cambia significativamente de forma durante el ciclo cardíaco, puede calcularse el volumen sistólico (VS) multiplicando VTI por el área de sección (AS) del TSVI[7].
Si existe un *shunt* o cortocircuito intracardíaco la medición no es aplicable y se deben buscar otros métodos.
El **volumen minuto** se determina por ecocardiografía, habitualmente mediante el cálculo del volumen de sangre que atraviesa en cada latido la válvula aórtica; por Doppler pulsado se obtiene el espectro de la velocidad de flujo a dicho nivel usando el plano apical de cinco cámaras, se lleva hacia atrás la cola del transductor para abrir la quinta cámara, que es la que permite una alineación más paralela entre la dirección del flujo y la línea de interrogación del Doppler[7].
La medición del flujo del VTI en el TSVI se realiza colocando el volumen de muestra de Doppler pulsado a nivel del TSVI, aproximadamente medio centímetro por encima del plano valvular.
Se obtendrá una imagen triangular (perfil de velocidad), que representa el espectro de velocidades de los hematíes que pasan por ese punto durante un latido; en ella debemos trazar el contorno del flujo de dicho triángulo y se obtendrán diversos valores, destacando entre ellos lo que se conoce como cálculo de la VTI, que se expresa en centímetros[7,8] **(Figura 1).**
Si el paciente está en ritmo sinusal se puede medir dos o tres veces, si está en fibrilación auricular deben tomarse al menos cinco latidos y realizar un promedio.
No se debe ver el clic de cierre de la válvula, se debe tratar de no sobreestimar si tuviera un desflecado, tratar de trazar por la línea densa para mayor precisión.
Los valores normales oscilan entre 18-23 cm, un valor inferior a 12 cm puede indicar bajo GC y mala función ventricular[8].
La **descarga sistólica** corresponde a la cantidad de eyección por la aorta de mililitros de sangre por latido y es el resultado de multiplicar el AS del TSVI por la VTI del TSVI **(Figura 2).**

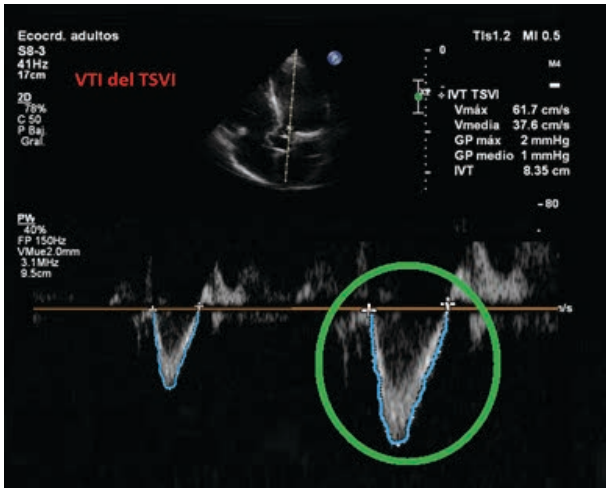


Figura 1. *Se muestra la medición de la VTI del TSVI desde una ventana apical de 5 cámaras. Por medio de Doppler pulsado se observa el trazado del espectro de la onda de flujo, en este caso de 8,35 cm, en un paciente con miocardiopatía dilatada isquémico necrótica con fracción de eyección severamente deprimida.*

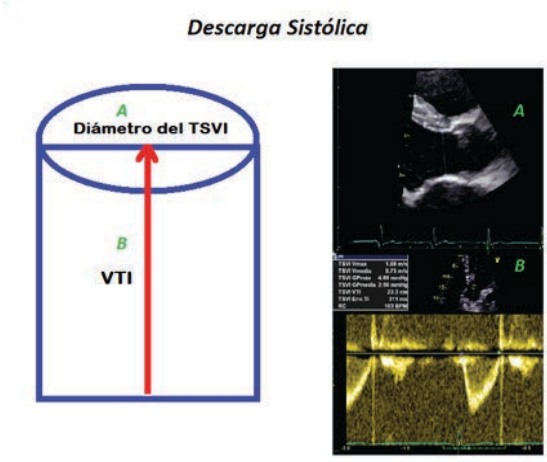


Figura 2. *Muestra un esquema que representa la descarga sistólica como producto del área del TSVI (A) por la VTI del TSVI (B).*

Descarga sistólica = Área del TSVI x VTI del TSVI

El **volumen minuto** es igual al resultado de la multiplicación de la descarga sistólica por la frecuencia cardíaca, calculada por ecocardiografía. Al comparar con métodos invasivos, puede tener una diferencia de 2 a 3 ml.

Volumen minuto = Descarga sistólica x Frecuencia cardíaca

En estudios experimentales se ha demostrado que el GC aumenta en proporción al área de superficie corporal (ASC). Por esta razón, lo más adecuado sería utilizar en su lugar el **índice cardíaco (IC)**, que es el resultado de ajustar el GC al ASC de la persona, y sus unidades son l/min/m^2; tanto el GC como el IC se modifican con la postura del paciente, la edad, el efecto del metabolismo y el ejercicio[8].

Índice cardíaco. Se calcula dividiendo el volumen minuto entre el área de superficie corporal del paciente.

Índice cardíaco = Volumen minuto / ASC

Resistencia vascular sistémica. También se puede calcular la resistencia vascular sistémica en dinas: es igual a tensión arterial media (TAM) menos la presión venosa central (PVC) x 80 dividido el volumen minuto.

Resistencia vascular sistémica = (TAM – PVC) x 80 / Volumen minuto

En presencia de insuficiencia mitral importante, parte del volumen minuto se eyecta en forma retrógrada a la aurícula izquierda. La TAM se puede obtener por la toma directa invasiva por medio de una línea arterial o estimando a partir de la toma por un esfigmomanómetro que nos darán los datos de la tensión arterial sistólica (TAS) y la tensión arterial diastólica (TAD) de forma no invasiva donde se aplica la siguiente fórmula[8].

Tensión arterial media = [(TAS – TAD) / 3] + TAD

Valoración respirofásica de la vena cava inferior. La ecografía de la vena cava inferior (VCI) es un método útil para realizar un seguimiento visual de los cambios dinámicos cualitativos de la PVC respecto a la presión intraabdominal (PIA). Cuando la PVC cae por debajo de la PIA, la VCI tenderá al colapso, y cuando la PVC se eleva por encima de la PIA, la VCI tenderá a distenderse tanto como lo permita su *compliance* o distensibilidad. Ha tenido poca correlación con la respuesta a fluidos, por lo que no es recomendable valorar de forma única[9].

Esta vista analiza la VCI de manera longitudinal; la posición correcta del transductor se obtiene haciendo una rotación aproximadamente de 70 a 90 grados en contra de las agujas del reloj a partir de una vista previa en posición subcostal, y apuntando la cabeza del transductor hacia atrás, de tal forma que el indicador del transductor esté aproximadamente en hora 12. Esta vista nos permite incluir la unión venoauricular y en pacientes delgados puede verse la vena cava superior. Una vez obtenida la imagen se procede a medir con modo M[9].

La valoración de la VCI nos permite la estimación de la precarga y de las presiones de llenado del ventrículo izquierdo[2] **(Figura 3)**.

Al menos el 90% de médicos del área crítica pueden medir la VCI; el valor normal del diámetro transversal de esta es menor de 21 mm[10].

Su valoración nos ayuda a estimar la presión de la aurícula derecha[1].

Sin embargo, su uso es muy controvertido, en especial en pacientes en asistencia respiratoria mecánica (ARM), en quienes se utiliza solo en caso de observar valores extremos ya que puede no predecir la respuesta a fluidos[9,10].

Al paciente sometido a ARM se lo puede valorar con elevación de miembros inferiores y así valorar el comportamiento, si tiene o no colapso ventilatorio la vena cava inferior.

Presión AD	Vena cava inferior (VCI)	Colapso inspiratorio VCI
5 mmHg	<21 mm	>50%
10 mmHg	>21 mm	>50%
15 mmHg	>21 mm	<50% o sin colapso
20 mmHg	>21 mm	Expansión sistólica

Figura 3. *A) ventana subcostal. 1: vena suprahepática; 2: vena cava inferior; 3: aurícula izquierda. B) VCI en modo M. 4: diámetro máximo; 5: diámetro mínimo: además, la estimación de la presión de la aurícula derecha.*

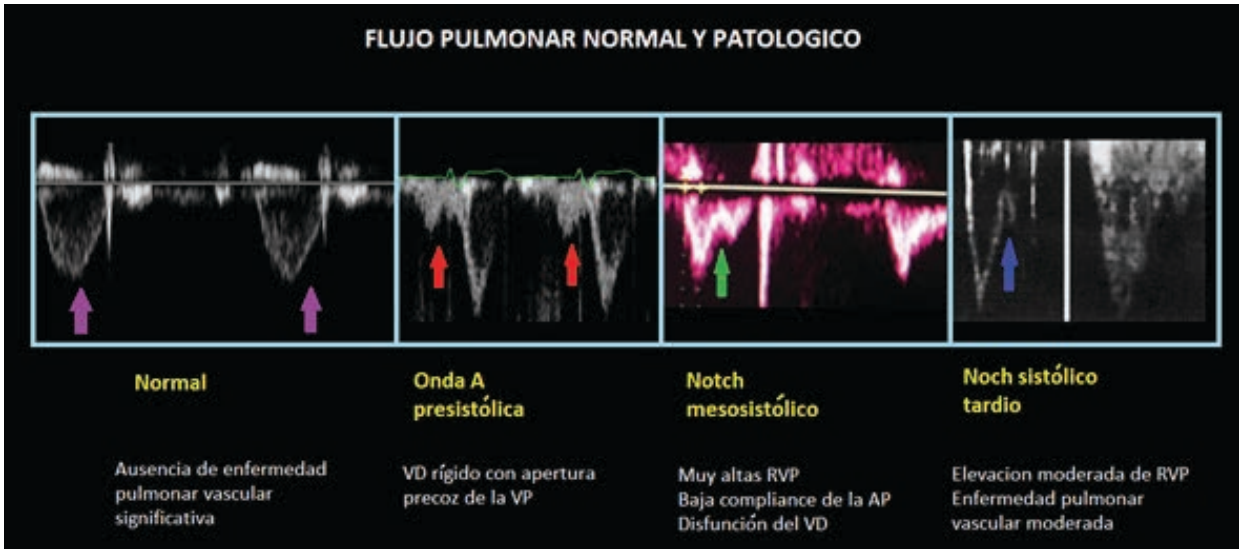


Figura 4. *Muestra la morfología de la onda de flujo pulmonar normal y patológico. VD: ventrículo derecho, VP: válvula pulmonar, RVP: resistencia vascular pulmonar, AP: arteria pulmonar.*

En pacientes en ARM, el índice de distensibilidad (ID) según Barbieri se calcula según la siguiente fórmula[10]:

ID en ARM =
= [(Diámetro máximo – Diámetro mínimo) / Diámetro mínimo] x 100

El valor normal es >18%, en ventilación espontánea este método tiene una sensibilidad y especificidad del 85-95%. El índice de colapsabilidad (IC) se puede obtener mediante la siguiente fórmula[9,10]:

IC en Ventilación espontánea =
= [(Diámetro máximo – Diámetro mínimo) / Diámetro máximo] x 100

Según Barbieri, el punto de corte es máximo cuando está en ventilación espontánea, y su valor es del 42%, obteniendo una sensibilidad y especificidad entre 31-97% respectivamente[10].

Volumen minuto derecho. Para calcular el volumen minuto derecho se deben tomar imágenes desde un eje corto a nivel de los grandes vasos en modo bidimensional, hay que subir un poco y apretar con fuerza el transductor, se debe medir el diámetro del tracto de salida del ventrículo derecho (TSVD), calcular el área de la sección y multiplicarla por la VTI pulmonar con Doppler por encima del plano valvular[10].

En presencia de *shunt* se puede calcular el Qp/Qs, que es el resultado de la descarga sistólica derecha sobre descarga sistólica izquierda. Un Qp/Qs superior a 1,5 indica *shunt* significativo[9,10].

Qp/Qs = Descarga sistólica derecha / Descarga sistólica izquierda.

Valoración sistólica del VD. Puede realizarse por medio del análisis de la onda S del Doppler tisular, cuyo valor normal es mayor a 10 cm/s, o también por medio de la valoración de la excursión sistólica del plano del anillo tricuspídeo (TAPSE):

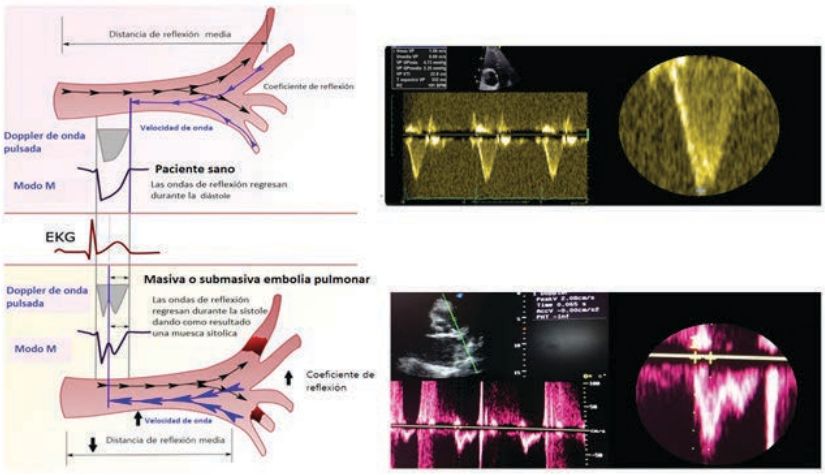

Distancia de reflexión media
Coeficiente de reflexión
Velocidad de onda
Doppler de onda pulsada
Modo M
Paciente sano
Las ondas de reflexión regresan durante la diástole
EKG
Masiva o submasiva embolia pulmonar
Doppler de onda pulsada
Las ondas de reflexión regresan durante la sístole dando como resultado una muesca sitolica
Modo M
Coeficiente de reflexión
Velocidad de onda
Distancia de reflexión media

Figura 5. *Diferencias en la ecocardiografía en modo M de la válvula pulmonar y el perfil Doppler de onda pulsada (PW) del TSVD en pacientes sanos (panel superior) en comparación con aquellos con embolia pulmonar severa (panel inferior, en la parte superior) se observa una onda de flujo normal que refleja las RVP normales y en la parte inferior la imagen de un paciente con tromboembolismo de pulmón masivo con onda pulmonar con muesca mesosistólica y RVP altas16.*

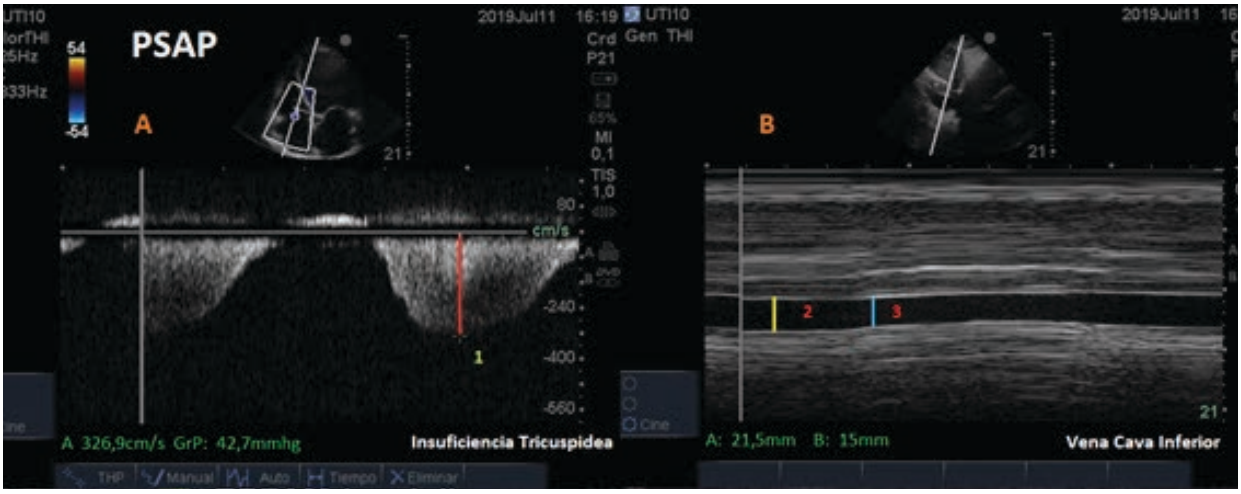


Figura 6. *Muestra las imágenes necesarias para realizar el cálculo de la PSAP. A) Se observa un espectro de flujo de insuficiencia tricuspídea por medio de Doppler continuo desde un eje apical de 4 cámaras; 1: Indica la medición que el software transforma en velocidad pico: 326.9 cm/s y gradiente pico: 42 mmHg, B) Se observa una vista subcostal a nivel de la vena cava inferior por modo M. 1: Diámetro máximo de la VCI: 21,5 mm, 2: Diámetro mínimo de la VCI: 15 mm.*

TAPSE
- VN: >18 milímetros (mm)
- 12-15 mm (deterioro moderado de la FSVD)
- <10 mm (deterioro severo de la FSVD)

Flujo pulmonar. El método indirecto más utilizado para la estimación de las presiones pulmonares es la valoración del flujo pulmonar mediante Doppler pulsado a nivel de la válvula pulmonar, el análisis de la morfología de la onda pulmonar se realiza en el eje paraesternal corto a nivel de los grandes vasos, colocando el volumen de muestra a nivel de la válvula pulmonar, en condiciones normales presenta una forma triangular que se acelera gradualmente con un pico en la porción media de la sístole seguido de un lento descenso[3] **(Figura 4).**

La onda A presistólica indica que cuando la aurícula derecha se contrae lo hace sobre un ventrículo derecho rígido restrictivo y eso genera la apertura precoz de la válvula pulmonar **(Figura 5),** además nos permite identificar la presencia de *notch* mesosistólico (onda con 2 picos por presencia de la escotadura mesosistólica) y sugiere resistencia vascular pulmonar (RVP) muy elevada de forma aguda (más de 5 unidades Wood).

Estos hallazgos son el resultado de la llegada más temprana de la reflexión de la onda de presión durante la sístole temprana característica en la embolia pulmonar masiva y submasiva, que ocurre debido a la distancia de reflexión promedio más corta, la velocidad de onda reflejada más rápida (resultante de la elasticidad arterial pulmonar reducida) y un mayor coeficiente de reflexión[3].

La presencia de una muesca mesosistólica es un signo de hipertensión pulmonar severa, con una sensibilidad del 56% y especificidad del 100% para una presión de arteria sistólica pulmonar (PSAP) >50 mmHg[3].

La presencia de muesca sistólica tardía indica la presencia de elevación moderada de las resistencias vasculares pulmonares[3].

La onda de flujo de velocidad pulmonar nos permite también medir el tiempo de aceleración que es el tiempo que transcurre desde el tiempo que inicia hasta que alcanza el pico (velocidad máxima), normalmente debe ser mayor a 80 milisegundos, si tiene 60 o 45 milisegundos es una

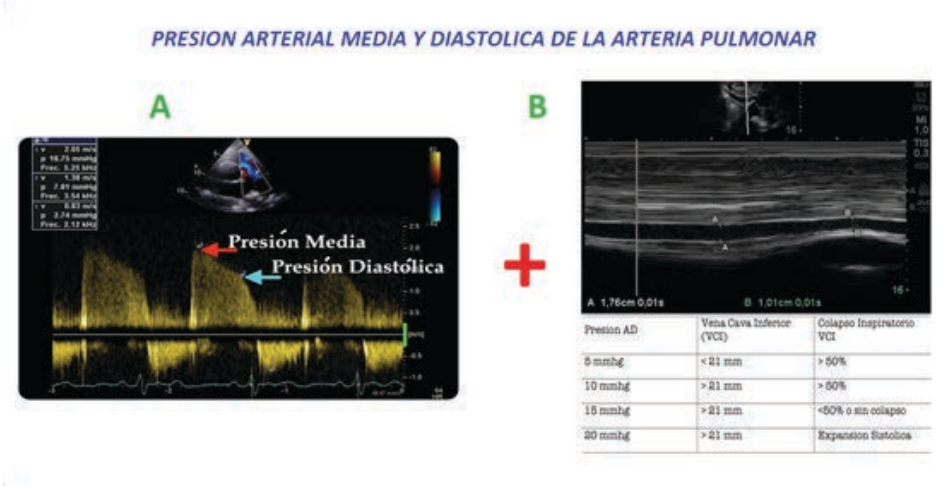


Figura 7. *A) Doppler color y continuo del flujo de la regurgitación pulmonar tomado desde eje corto a nivel de grandes vasos, la flecha roja indica el sitio de medición de la velocidad para calcular la PMAP y la flecha azul el sitio de medición de la velocidad para el cálculo de la PDAP, a estas mediciones se le añade el valor esimado de presión de la AD detallada en B.*

aceleración del flujo lo que sugiere aumento en la resistencia pulmonar, en el troemboembolismo pulmonar forma parte del signo de "60/60" en donde un tiempo de aceleración del flujo pulmonar menor a 60 sugiere aumento de la resistencia vascular pulmonar[3,10,16].

PRESIONES PULMONARES

Medición de la presión sistólica de la arteria pulmonar. La medición de la presión sistólica de la arteria pulmonar (PSAP) se realiza a través de la velocidad de regurgitación tricuspídea (RT) guiándonos por modo color y por medio de Doppler continuo. En pacientes ventilados es frecuente la presencia de RT, por lo que su cálculo es muy habitual[16].

Al medir con cáliper la velocidad de regurgitación tricuspídea, el equipo por medio de la ecuación de Bernoulli transforma este valor en milímetros de mercurio, a este valor se añade la presión estimada de la aurícula derecha obtenida por valoración de la vena cava inferior (VCI) **(Figura 6).**

PSAP = Velocidad de regurgitación tricuspídea en mmHg + Presión de la aurícula derecha

En el caso del paciente ejemplificado en la figura, la resultante sería:

PSAP = 42,7 mmHg + 10 mmHg
= 52,7 mmHg

Medición de la presión media de la arteria pulmonar. La presión media arterial pulmonar (PMAP) es una variable hemodinámica para el diagnóstico, clasificación y pronóstico de la hipertensión pulmonar; su cuantificación se realiza en forma invasiva por cateterismo cardíaco derecho (CCD) y no invasivamente por ecocardiografía Doppler[16,17].

Se puede estimar la PMAP a partir de la PSAP por medio de una fórmula propuesta por Chemla. La fórmula es la siguiente[17]:

PMAP (Fórmula de Chemla) = 0,61 x PSAP + 2 mmHg

También se puede estimar la PMAP desde la regurgitación pulmonar, a través de un eje corto de los grandes vasos con Doppler pulsado o continuo, colocando la muestra de volumen a nivel de la válvula pulmonar y midiendo la velocidad máxima del flujo regurgitante pulmonar al final de la diástole; con la ecuación de Bernoulli modificada se determina el gradiente de presión entre el ventrículo derecho y la arteria pulmonar, se suma la presión de aurícula derecha y la velocidad al comienzo de la diástole más la presión de la aurícula derecha y se obtiene la PMAP **(Figura 7).**

Otro modo de estimar la PMAP es por medio del tiempo de aceleración pulmonar (TA) con la fórmula de Dabestani-Mahan's.

El TA pulmonar no es un método preciso, pero ayuda a separar a los pacientes con presión pulmonar normal de los pacientes con hipertensión arterial pulmonar (HAP; PMAP >20 mmHg)[3,10].

La fórmula que se utiliza en este método es:

PMAP (Dabestani-Mahan's) =
= 90 – (0,62 x Tiempo de aceleración en ms)

A medida que disminuye el tiempo de aceleración disminuye la sensibilidad, pero incrementa la especificidad para la detección de HAP:

- TA <120 ms, sensibilidad =91%, especificidad =63%.
- TA <110 ms, sensibilidad =87%, especificidad =88%.
- TA <100 ms, sensibilidad =78%, especificidad =100%.

En pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica, un TA <100 ms en reposo indica HAP con una sensibilidad del 95% y una especificidad del 97%[5].

Resistencia vascular pulmonar. Se mide la velocidad en metros de la regurgitación tricuspídea, desde 4 cámaras por Doppler color continuo, dividiendo este valor por el VTI del TSVD, el valor de corte es 0,20, si supera este valor sugiere aumento de RVP.

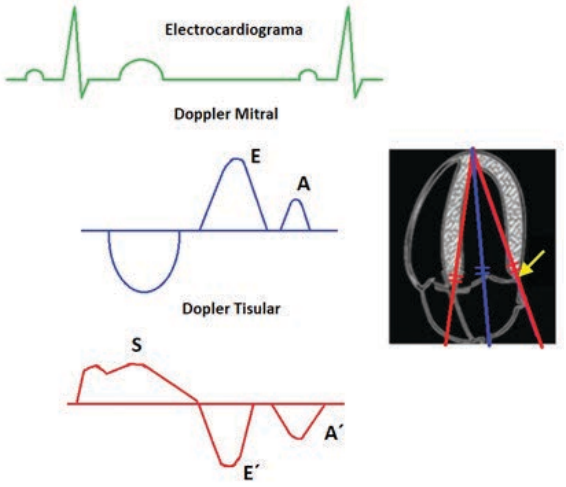


Figura 8. Registro con Doppler tisular pulsado en el anillo mitral que muestra ondas sistólica (S) anterógrada, E y A.

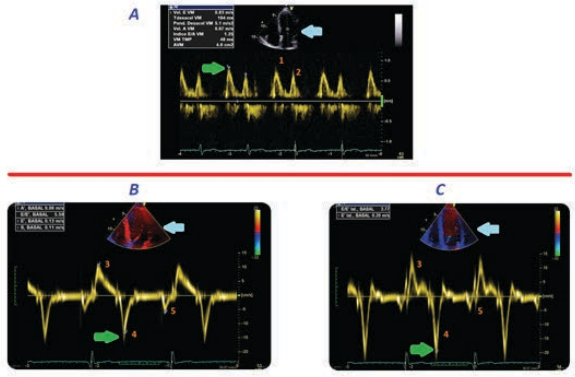


Figura 9. Muestra las mediciones para el cálculo de la relación E/e' donde A corresponde a la imagen del flujo mitral normal. 1: onda e. 2: onda a. B) Registro con Doppler tisular pulsado en el anillo septal y lateral. 3: onda s. 4: onda e'. 5: onda a'.

RVP = (Velocidad de regurgitación tricuspídea en metros / VTI del TSVD) x 10 + 0,16
- VN: < 0,175 (1 unidad Woods es = 80 din·s·cm^{-5})
- Si la RVS es >8 unidades Woods, este método pierde valor.
- *Notch* mesosistólico: >5 unidades Wood, elevadas RVP con probable HPT reactiva

Patrón E/a. Mayor a 2 sugiere un patrón restrictivo en el flujo transmitral que indica la presencia de elevación de las presiones de fin de diástole del VI (PDF), se mide a través de Doppler pulsado con la muestra sobre los velos de la válvula mitral.

Presión capilar pulmonar (PCP). En pacientes con inestabilidad hemodinámica, conocer la PCP es básico como indicador de la precarga del ventrículo izquierdo, y es el reflejo de la presión de la aurícula izquierda. Puede estimarse de forma fiable mediante parámetros de función diastólica obtenidos con ecocardiografía Doppler[11,16].

La e' se comporta como un índice de relajación del VI independiente de la carga previa. La velocidad E del flujo transmitral cuando se corrige la influencia de la relajación mediante el uso de la relación E/e' se correlaciona bien con la presión media de la cuña capilar pulmonar (PCWP) obtenida mediante mediciones simultáneas del catéter[4,5].

Para valorar el flujo de llenado mitral, se explora desde el método bidimensional de la ventana apical de 4 cámaras mediante Doppler pulsado, colocando el volumen de muestra a nivel de los bordes libres de los velos mitrales, en sujetos en ritmo sinusal, se obtiene un registro que consta de 2 ondas: onda E, de llenado rápido protodiastólico y una onda A. A continuación se procede a medir por medio de Doppler tisular, que es una variante del pulsado; en la mayoría de los ecógrafos esta herramienta ya está incorporada, pero si el equipo no cuenta con Doppler tisular, se puede setear de manera manual, esta medición se realiza desde bidimensional de una ventana apical de 4 cámaras, colocando la muestra de Doppler tisular, generalmente en la porción septal y lateral del anillo, el registro presenta una onda sistólica anterógrada (S), seguida de una imagen en espejo del llenado mitral compuesta por 2 ondas retrógradas: una onda e' (e prima) y una onda a' (a prima). Para nuestro cálculo usaremos la velocidad de la onda e', la misma que se promedia entre la septal y lateral, o de no ser posible, usar la septal que es la más validada[4,6,7] **(Figuras 8 y 9).** Con estos datos obtenidos podemos calcular la relación E/e' que tiene correlación con la PCP.

Relación E/e'. Es el cociente entre la velocidad pico de la onda E mitral y la velocidad e´ del anillo lateral mitral (E/e'). Muestra buena correlación con la PCP: valores >15 predicen una PCP >15 mmHg, valores <8 se asocian con valores normales de la PCP, pero los valores de la relación E/e' entre 8 y 15 tienen valores predictivos bajos[4,6,7].

Con una relación E/e' mayor a 15 o si está en zona gris (entre 8 y 15) se puede complementar con ecografía pulmonar **(Figura 9).**

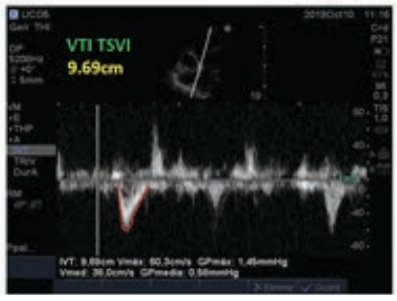
E/e´ = Onda E / (E´ lateral + E´septal) / 2

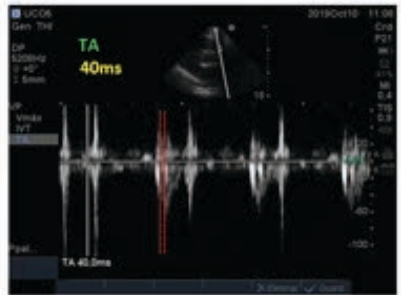
Cálculo de PCP en mmHg por la fórmula de Nagueh. En la actualidad existe la posibilidad de estimar la PCP por medio de la fórmula de Nagueh, que podría facilitar la evaluación de la función diastólica ventricular izquierda[4].

PCWP (Fórmula de Nagueh) = 1,24 x (E/e`) + 1,9

VEAMOS UN EJEMPLO

Se decide evaluar a una paciente femenina de 87 años que ingresa a sala de cuidados críticos por insuficiencia cardíaca descompensada, presenta deterioro de la función ventricular izquierda con FEy de 20%, derrame pericárdico leve y derrame pleural significativo.





Parámetro	Medida
Diámetro del TSVI	2 cm
VTI del TSVI	9,69 cm
Tiempo de aceleración pulmonar	40 ms
Área de superficie corporal	1,5 m^2
Frecuencia cardíaca	77 lpm
Tensión arterial	100/60 mmHg
Presión venosa central	10 cmH_20

Diámetro esperado del TSVI =

= (5,7 × área de superficie corporal) + 12,1

= (5,7 × 1,5) + 12,1 = 20,65 mm

Área del TSVI =

= (Diámetro TSVI /2)^2 × π

= (2/2)^2 × 3,14 = 3,14 cm^2

Descarga sistólica =

= área del TSVI × VTI del TSVI

= 3,14 × 9,69 cm = 30,42 ml

Volumen minuto =

= Descarga sistólica × frecuencia cardíaca

= 30,42 ml × 77 lpm = 2,34 l/min

Índice cardíaco =

= volumen minuto / área de superficie corporal

= 2,34 l/min / 1,5 m^2 = 1,56

Tensión arterial media (TAM) =

= [(TAS – TAD) / 3] + TAD

= [(100 mmHg – 60 mmHg) / 3) + 60 mmHg = 73 mmHg

Resistencia vascular sistémica =

= [(TAM – PVC) × 80] / VM

= [(73 – 10) × 80] / 2,34 l/lpm = 2.153,84 dyn·s·cm^{-5}

CONCLUSIÓN

El monitoreo hemodinámico se ha convertido en un método accesible y de incalculable valor a la hora de hacer diagnóstico, tratar a un paciente e incluso controlar se evolución; es por lo ante dicho que el médico de unidad crítica debe conocer a la perfección este método.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Vignon P, Begot E, Mari A, Silva S, Chimot L, Delour P, et al. Hemodynamic Assessment of Patients With Septic Shock Using Transpulmonary Thermodilution and Critical Care Echocardiography: A Comparative Study. Chest 2018;153(1):55-64.*
2. *Bodson L, Vieillard-Baron A. Respiratory variation in inferior vena cava diameter: surrogate of central venous pressure or parameter of fluid responsiveness? Let the physiology reply. Crit Care 2012;16(6):181.*
3. *Dabestani A, Mahan G, Gardin JM, Takenaka K, Burn C, Allfie A, et al. Evaluation of pulmonary artery pressure and resistance by pulsed Doppler echocardiography. Am J Cardiol 1987;59(6):662-8.*
4. *Nagueh SF, Middleton KJ, Kopelen HA, Zoghbi WA, Quiñones MA. Doppler tissue imaging: a noninvasive technique for evaluation of left ventricular relaxation and estimation of filling pressures. J Am Coll Cardiol 1997;30(6):1527-33.*
5. *Lancellotti P, Price S, Edvardsen T, Cosyns B, Neskovic A, Dulgheru R, et al. The use of echocardiography in acute cardiovascular care: recommendations of the European Association of Cardiovascular Imaging and the Acute Cardiovascular Care Association. Eur Heart J Acute Cardiovasc Care 2015;4(1):3-5.*
6. *Neskovic AN, Hagendorff A, Lancellotti P, Guarracino F, Varga A, Cosyns B, et al. Emergency echocardiography: the European Association of Cardiovascular Imaging recommendations. Eur Heart J Cardiovasc Imaging 2013;14(1):1-11.*
7. *Neskovic AN, Edvardsen T, Galderisi M, Garbi M Gullace G, Jurcut R, et al. Focus cardiac ultrasound: the European Association of Cardiovascular Imaging viewpoint. Eur Heart J Cardiovasc Imaging 2014;15(9):956-60.*
8. *Steeds RP, Garbi M, Cardim N, Kasprzak J, Sade E Nihoyannopoulos P, et al. EACVI appropriateness criteria for the use of transthoracic echocardiography in adults: a report of literature and current practice review. Eur Heart J Cardiovasc Imaging 2017;18(11):1191-204.*
9. *Jensen MB, Sloth E, Larsen KM, Schmidt MB. Transthoracic echocardiography for cardiopulmonary monitoring in intensive care. Eur J Anaesthesiol 2004;21(9):700-7.*
10. *Maslow A, Comunale ME, Haering JM, Watkins J. Pulsed wave Doppler measurement of cardiac output from the right ventricular outflow tract. Anesth Analg 1996;83(3):466-71.*
11. *Araujo AQ. Elucidating the B bump on the mitral valve M-mode echogram in patients with severe left ventricular systolic dysfunction. Int J Cardiol 2004;95(1):7-12.*
12. *Lax JA, Bermann AM, Cianciulli TF, Morita LM, Masoli O, Prezioso H. Estimation of the ejection fraction in patients with myocardial infarction obtained from the combined index of systlic and diastolic left ventricular function: a new method. J Am Soc Echocardiogr 2000;13(2):116-23.*
13. *Liu D, Hu K, Herrmann S, Cikes M Ertl G, Weidemann F. et al. Value of tissue Doppler-derived Tei index and two-dimensional speckle tracking imaging derived longitudinal strain on predicting outcome of patients with light-chain cardiac amyloidosis. Int J Cardiovasc Imaging 2017;33(6):837-45.*
14. *Slama M, Maizel J. Echocardiographic measurement of ventricular function. Curr Opin Crit Care 2006;12(3):241-8.*
15. *Jingi AM, Hamadou B, Noubiap JJ, Feukeu-Kuate LM Boombhi J Nadege Nganou C, et al. Correlations of left ventricular systolic function indices with aortic root systolic excursion (ARSE): A cross-sectional echocardiographic study. PLoS One 2018;13(11):e0206199.*
16. *Afonso L, Sood A, Akintoye E, Gorcsan J, Rehman MU, Kumar K, et al. A Doppler Echocardiographic Pulmonary Flow Marker of Massive or Submassive Acute Pulmonary Embolus. J Am Soc Echocardiogr 2019;32(7):799-806.*
17. *Chemla D, Castelain V, Humbert M, Hébert JL, Simonneau G, Lecarpentier Y, et al. New formula for predicting mean pulmonary artery pressure using systolic pulmonary artery pressure. Chest 2004;126(4):1313-7.*

Tabla 3. *Valores de referencia más usados en monitoreo hemodinámico.*

Parámetro	Valor
Fracción de acortamiento (FAc)	**VN: >28% (FSVI conservada)**
Fracción de eyección mediante el método de Teichholz	**VN: >55-60% (FSVI conservada)**
dP/dt máx (VI)	**VN: ≥ 1200 mmHg/s (FEVI >50%)** 800-1200 mmHg/s (deterioro leve a moderado de la FSVI) <600 mmHg/s (FEVI <50%)
Índice de Tei	**VN: 0.30-0.40** >0,5 (IC)
Excursión sistólica del plano del anillo mitral (ESPAM)	**VN: septal: ≥10 mm** **VN: lateral: ≥16 mm**
Excursión sistólica de la raíz aórtica (ARSE)	<6.6 (FEVI <55% por Simpson)
Distancia mitroseptal	**VN: ≤ 7 mm** <7 mm sugiere FEVI más del 50% 7-13 mm sugiere FEVI 31-40% >20 mm sugiere FEVI <30%
onda sistólica tisular lateral del VI	**VN: >8 cm/s (FEVI normal)** 3-5.5 cm/ (FEVI moderadamente deprimida) <3 cm/s (FEVI severamente deprimida)
Fracción de eyección del VI (FEVI) por Simpson biplano	**FEVI** **VN: 52-72%** 41-51% (deterioro leve) 30-40% (deterioro moderado) <30% (deterioro severo) **Límite superior de los volúmenes de VI:** **Hombres:** Volumen de fin de sístole: 31 ml/m^2 Volumen de fin de diástole: 74 ml/m^2 **Mujeres:** Volumen de fin de sístole: 24 ml/m^2 Volumen de fin de diástole: 61 ml/m^2
Gasto cardíaco o volumen minuto	Varón adulto joven: 4-6 l/min Mujer: 10% menos que en el varón.
Tracto de salida del ventrículo izquierdo	**VN: 18-23 mm** <12 (bajo gasto, FEVI severamente deprimida)
Descarga sistólica	70 a 90 ml/lat
Indice cardiaco	3-5 l/min/m^2
Resistencia vascular sistémica	1.600-2.400 dyn·s·cm^{-5}
Vena cava inferior	**VN: <21 mm** <21 mm y >50% colapso (PAD: 5 mmHg) >21 mm y >50% colapso (PAD: 10 mmHg) >21mm y <50% o sin colapso (PAD: 15 mmHg) >21 mm y expansión sistólica (PAD: 20 mmHg) ID en ARM: VN >18% IC en VE: >42%
Qp/Qs	>1,5
Excursión sistólica del plano del anillo tricuspídeo (TAPSE)	**VN: >18 mm** 12-15 mm (deterioro moderado de la FSVD) <10 mm (deterioro severo de la FSVD)
Onda sistólica tisular de la pared libre del VD	**VN: >10 cm/s (FSVD normal)** <5 cm/s (FSVD severamente deprimida)
Tiempo de aceleración pulmonar	>80 ms <60 ms (RVP elevadas)
Medición de la presión media de la arteria pulmonar (PMAP)	> 25 mmHg (PSAP >38 mmHg)
Resistencia vascular pulmonar	**VN: <175 (1 unidad Wood = 80 dyn·s·cm^{-5})** si la RVS es >8 unidades Wood, este método pierde valor
Patrón E/A	>2 (patrón restrictivo: PFDVI elevada)
Presión capilar pulmonar (PCP)	e' septal >7 e' lateral >10 relación e/e' VN: <8 cm/s 15 cm/s (PCP >15 mmHg) 8 y 15 cm/s (zona gris)
Onda pulmonar (*notch* mesosistólico)	RVP elevada (>5 unidades Wood con probable HTP reactiva)

FAc: fracción de acortamiento. VN: valor normal. VI: ventrículo izquierdo. FSVI: función sistólica del ventrículo izquierdo. FEVI: fracción de eyección del ventrículo izquierdo. IC: índice cardíaco, PAD: presión de la aurícula derecha. ID: índice de distensibilidad. ARM: asistencia respiratoria mecánica. IC: índice de colapsabilidad. FSVD: función sistólica del ventrículo derecho. PFD: presión de fin de diástole del ventrículo izquierdo. PCP: presión capilar pulmonar. RVP: resistencia vascular pulmonar, HTP: hipertensión pulmonar.